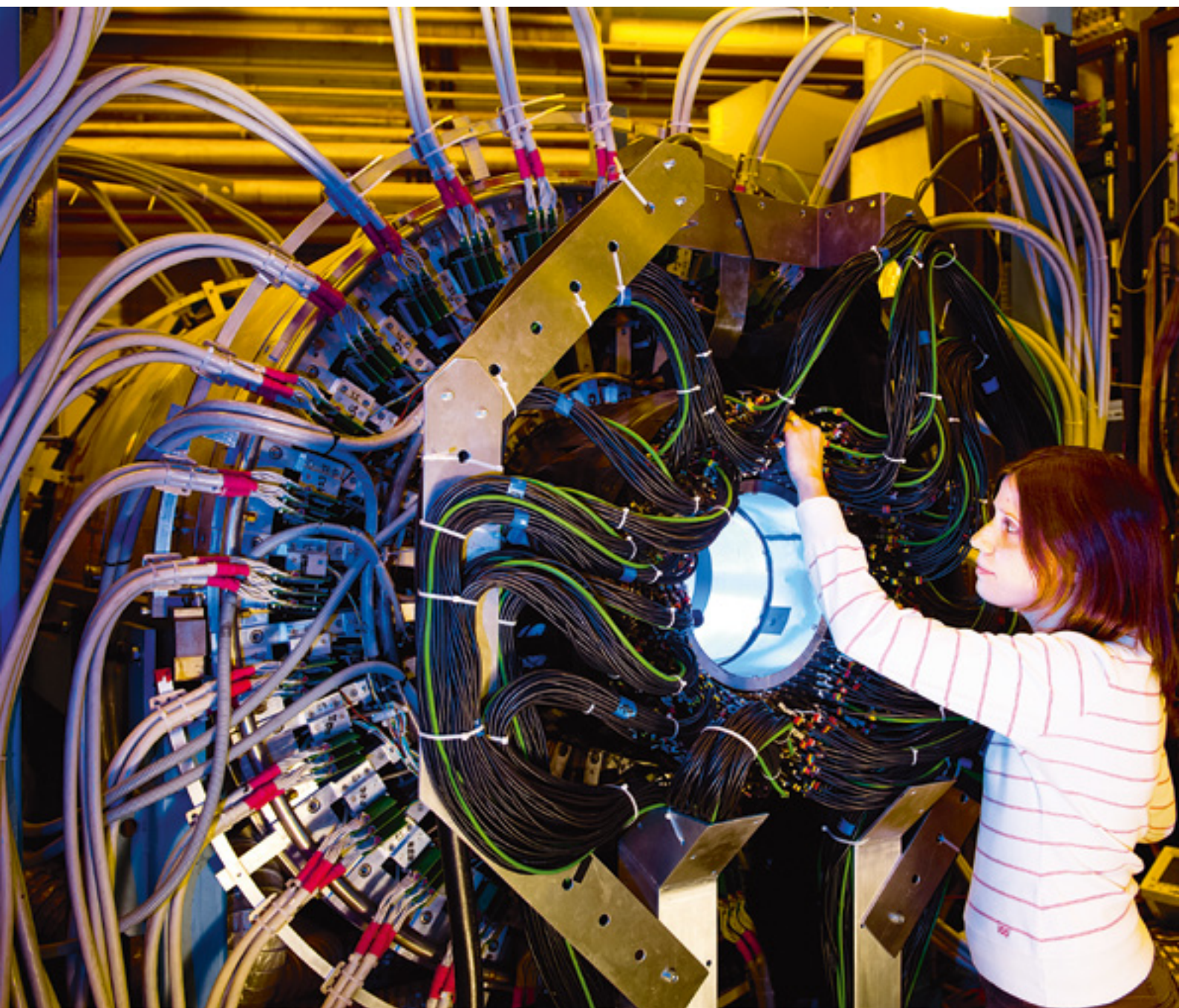


„Ich sehe was, was du nicht siehst...“

Forschung an den kleinsten Bausteinen
und dem Aufbau der Materie

Von Volker Metag und Ulrich Mosel



Wissenschaftler aus Bochum, Bonn und Gießen erforschen gemeinsam die kleinsten Bausteine und den Aufbau der uns umgebenden Materie. Zentrales Forschungsinstrument des Transregio-Sonderforschungsbereich „Subnuclear Structure of Matter“ (SFB/TRR 16) ist ein Elektronenbeschleuniger an der Universität Bonn, die Elektron-Stretcher Anlage ELSA. Im Zusammenwirken von Experimentalphysikern und Theoretikern wird die Struktur der Materie entschlüsselt.

Mit bloßem Auge erscheint uns im täglichen Leben die uns umgebende Materie kontinuierlich. Erst mit den Methoden der Physik wie dem Lichtmikroskop, dem Elektronenmikroskop, dem Kraftmikroskop und schließlich großen Beschleunigeranlagen wird sichtbar, dass Materie eine Substruktur besitzt und aus einer ganzen Hierarchie von Strukturen aufgebaut ist. (siehe Text „Die Hierarchien in der Struktur der Materie“). Biologische Materialien bestehen aus Großmolekülen. Viele Festkörper haben dagegen eine kristalline oder polykristalline Struktur. Untersucht man diese näher, so erkennt man, dass diese Großmoleküle bzw. Kristalle aus einer regulären Anordnung von Atomen bestehen. Entgegen ihrem Namen, der von ‚atomos‘ (griech.) ‚unteilbar‘ kommt, sind Atome jedoch keineswegs unteilbar und elementar, sondern bestehen aus einem Atomkern, der nahezu die gesamte Masse enthält, und einer Hülle aus Elektronen. Den Vorstoß in diese Dimensionen schafft man mit Teilchenbeschleunigern unter Ausnutzung der Erkenntnis der modernen Physik, dass Teilchen auch Welleneigenschaften besitzen: Je höher die Teilchenenergie, desto kürzer die Wellenlänge und desto feinere Strukturen kann man auflösen und damit „sichtbar“ machen.

Wie wir heute wissen, besteht der Atomkern aus Nukleonen, den positiv geladenen Protonen und den elektrisch neutralen Neutronen. Aber auch damit ist die unterste Stufe in der Hierarchie der Materiestruktur noch nicht erreicht. Seit den sechziger und siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts ist bekannt, dass auch die Nukleonen nicht die kleinsten

Bausteine der Materie sind; vielmehr sind sie aus den so genannten Quarks aufgebaut, die durch „Klebeilchen“, Gluonen genannt, zusammengehalten werden. Damit sind wir bei den Teilchen angelangt, die nach unserem gegenwärtigen Verständnis zusammen mit den Elektronen die punktförmigen elementaren Bausteine darstellen, aus denen letztlich die uns umgebende Materie und die sichtbare Materie im Universum aufgebaut ist.

Die im Transregio-Sonderforschungsbereich 16 „Subnuclear Structure of Matter“ (SFB/TRR 16) kooperierenden Wissenschaftler der Universitäten Bochum, Bonn und Gießen (siehe Text „Der Transregio-Sonderforschungsbereich 16“) haben es sich zum Ziel gesetzt, diese Quark-Gluon-Substruktur der Nukleonen sowohl experimentell wie theoretisch zu untersuchen und aufzuklären. Insbesondere geht es um die Frage, welche Kräfte zwischen den Quarks wirken. Diese Kräfte sind auch für die kurzlebige Existenz von Teilchen verantwortlich, die aus Quarks und Antiquarks, also aus Materie und Antimaterie, zusammengesetzt sind. Auch die Eigenschaften dieser so genannten Mesonen sind ein zentrales Thema im Forschungsprogramm des SFB/TR16.

Zwar glaubt man die grundlegende Theorie zur Beschreibung der Kräf-

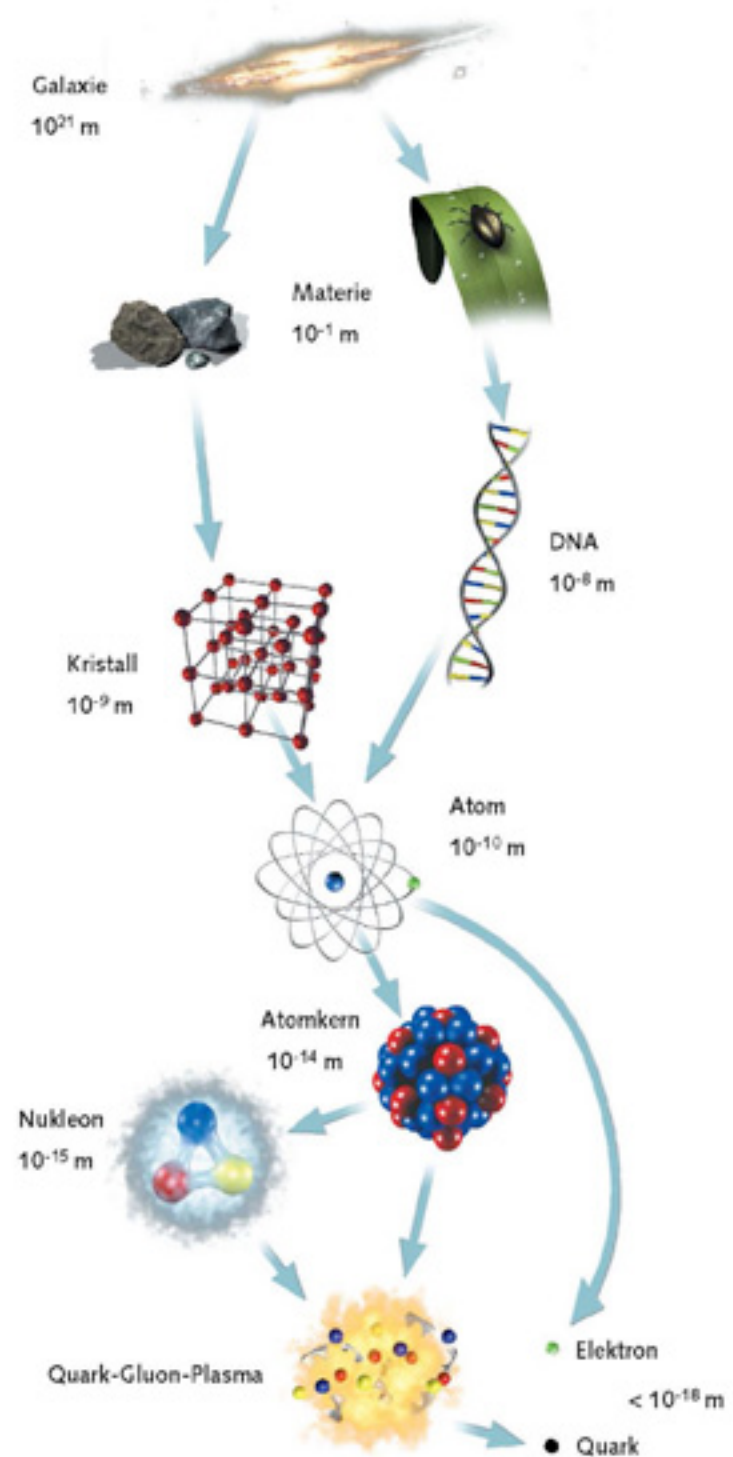


■ Blick in die „Kristallkugel“ (*Crystal Barrel*)

te zwischen den Quarks in Form der QuantenChromoDynamik (QCD) zu kennen, wegen der ungeheuren Stärke der Kräfte sind ihre exakten Lösungen auch mit den schnellsten heute verfügbaren Computern aber praktisch nicht zu gewinnen. Wie bei der erfolgreichen Aufdeckung des Atomaufbaus erwartet man auch für Nukleonen und Mesonen, übergreifend auch als Hadronen (stark wechselwirkende Teilchen) bezeichnet, wichtige Erkenntnisse aus dem Studium des Anregungsspektrums durch die Vermessung von Zahl, Energie und sonstiger Eigenschaften angeregter Zustände, so genannter Resonanzen. Für diese Aufgabe sind hochenergetische Elektronen und damit erzeugbare Lichtteilchen (Photonen) besonders geeignet.

Erst in jüngerer Zeit wurden die Bedingungen für aussagekräftige Experimente geschaffen: Die Elektronen müssen mit Beschleunigern auf die notwendigen hohen Energien gebracht werden, kontinuierlich und mit ausgerichtetem Drehsinn (Spin) geliefert und auf ein ebenso spinpolarisiertes Ensemble von Protonen gerichtet werden. Schließlich müssen die bei der Abregung der angeregten Zustände ausgesandten Teilchen von einem leistungsfähigen Detektor (siehe Text „Der Crystal Barrel/TAPS-Detektor“) registriert und identifiziert, zeitlich zu einzelnen Reaktionen zugeordnet und nach ihrer Herkunft aus bestimmten Zuständen sortiert werden können.

Diese vielseitigen Voraussetzungen sind am Bonner Elektronbeschleuniger ELSA (siehe Text „Die Elektronenbeschleunigeranlage ELSA“) mit seinem polarisierten Elektronstrahl und der Entwicklung polarisierter Proton- und Neutron-Targets als einem der ganz wenigen Labors weltweit erfüllt. Die ersten Experimente konzentrieren sich auf die Suche nach theoretisch vermuteten, bislang aber nicht gefundenen Resonanzen und die Untersuchung hoher Anregungen, die durch



■ Abb. 1: Mit verschiedenen physikalischen Methoden gelingt es, die unterschiedlichen Hierarchie-Ebenen in der Struktur der Materie offenzulegen. Ähnlich wie bei einer Matroschka-Puppe ergeben sich immer wieder kleinere Strukturen, bis man auf dem Niveau der Elektronen und Quarks ankommt, die man nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand als die elementaren, nicht weiter teilbaren Materieteilchen ansieht. Jede Hierarchie-Ebene ist durch eine typische Längendimension charakterisiert.

ihre Zerfallskaskaden mit dem Photonspektrometer Crystal Barrel/TAPS identifiziert werden; ebenso werden Änderungen der Eigenschaften von Hadronen untersucht, wenn diese in Atomkerne eingebettet werden. Die Resultate sollen mit neuen effektiven Theorien und theoretischen Modellen interpretiert und verglichen werden und so entscheidende Aufschlüsse über die Struktur der Hadronen als gebundene Systeme stark wechselwirkender Quarks liefern.

Die bisherigen Experimente und Analysen haben auf dem Gebiet der Nukleonenspektroskopie einen Durch-

bruch gebracht. Durch Verwendung polarisierter Photonenstrahlen und polarisierter Nukleonen konnten viele bislang bestehende Mehrdeutigkeiten in der Bestimmung der Quantenzahlen und sonstigen Eigenschaften von angeregten Zuständen des Nukleons (siehe Kasten 5: Theoretische Analysen der Hadronenspektren) aufgelöst werden. Diese Ergebnisse gehen unmittelbar in die theoretische Beschreibung der Nukleonenstruktur ein. Die experimentellen Untersuchungen zur Änderung der Eigenschaften von Hadronen in einem stark wechselwirkenden Medium wie einem Atomkern

zeigen gute Übereinstimmung mit den von der Theorie vorhergesagten Effekten. Damit ist es gelungen, auch für die starke Wechselwirkung nachzuweisen, dass die Umgebung die Eigenschaften von Teilchen modifiziert – ähnlich wie in anderen Bereichen der Physik z.B. bei Elektronen im Festkörper – aber dies bei gänzlich anderen Kräften und in Volumina von nur wenigen Millionstel-Milliardstel Metern.

An diesen wissenschaftlichen Erfolgen waren die Gießener Teilprojektleiter mit ihren Arbeitsgruppen maßgeblich beteiligt. So haben Prof. Volker

Der Transregio-Sonderforschungsbereich „Subnuclear Structure of Matter“

Im SFB/TRR 16 erforschen 14 Professorinnen und Professoren mit etwa 30 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in 16 Teilprojekten die Struktur der Materie. Im Rahmen von sechs Teilprojekten werden Experimente am Elektronenbeschleuniger ELSA durchgeführt; sieben Teilprojekte sind auf die theoretische Interpretation der Messergebnisse ausgerichtet; vier weitere Teilprojekte befassen sich mit der wissenschaftlich-technischen Weiterentwicklung der Beschleunigeranlage und Nachweissysteme. Insgesamt arbeiten in allen Teilprojekten etwa 80 Doktorandinnen und Doktoranden mit. Sprecher des SFB/TRR 16 ist Prof. Dr. Ulf-G. Meißner (Bonn). Die Universität Gießen ist durch Prof. Dr. Volker Metag im Vorstand des SFB/TRR 16 vertreten.

Die Gießener Wissenschaftler sind in allen drei Teilbereichen (Experiment, Theorie, Technologie-Entwicklung) aktiv vertreten:

Prof. Volker Metag untersucht mit seiner Arbeitsgruppe, inwieweit die

Eigenschaften von Mesonen verändert werden, wenn man sie in Atomkernen implantiert. Prof. Ulrich Mosel und seine Mitarbeiter führen in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Metag theoretische Modellrechnungen zu den Eigenschaften von Mesonen in Kernmaterie durch. Prof. Horst Lenske und Prof. Ulrich Mosel untersuchen gemeinsam mit ihren Mitarbeitern in Modellrechnungen das Anregungsspektrum von Nukleonen. Dr. Rainer Novotny arbeitet mit seinem Team an der Optimierung des Detektorsystems, die eine effektivere Nutzung der Strahlzeiten ermöglichen soll.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft stellte zur Förderung des gesamten Sonderforschungsbereichs/Transregio 16 bislang zehn Millionen Euro verteilt über sechs Jahre zur Verfügung. 2011 wird eine dritte Förderperiode beantragt werden. Die wissenschaftlichen Erfolge des gesamten SFB/TRR 16 spiegeln sich in bisher nahezu 300 Publikationen

in referierten Zeitschriften wider ebenso wie in fast 350 Vortragseinladungen an die beteiligten Wissenschaftler. Darüber hinaus spielt der Ausbildungsaspekt eine bedeutende Rolle: Die insgesamt über 80 Doktoranden profitieren von den einzigartigen Forschungsmöglichkeiten und den speziell angebotenen Lehrveranstaltungen, *workshops*, *lecture weeks* und der *hadron physics summer school*.

Die wissenschaftliche Attraktivität des Transregio ist auch für Universitäten so groß, dass es bereits in der ersten Förderperiode an den Standorten Bochum und Bonn gelang, insgesamt zwei W3- und eine W2-Professur sowie eine Juniorprofessur mit jungen, engagierten und an den Fragestellungen des Transregio interessierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zu besetzen. In Gießen wird versucht, dieses Arbeitsgebiet über eine W3-Professur für Experimentalphysik langfristig abzudecken.

Metag und seine Mitarbeiter die international weit beachteten Experimente zu Medium-Veränderungen von Hadronen durchgeführt. Entscheidend für den Erfolg dieser komplizierten Experimente war die ständige Verbesserung des Nachweissystems durch das Team um Dr. Rainer Novotny, der einer der weltweit anerkannten Experten für elektromagnetische Kalorimeter ist. Prof. Ulrich Mosel hat eine international führende Rolle bei der Berechnung von in-Medium Eigenschaften von Hadronen und Prof. Horst Lenske und Prof. Ulrich Mosel haben mit Doktoranden erste große gekoppelte-Kanal-Rechnungen zur Bestimmung der Nukleonenstruktur durchgeführt. Die nahezu einmalig starke Vernetzung und enge Zusam-

menarbeit von Experiment und Theorie in Gießen waren ausschlaggebend für den deutlich sichtbaren Beitrag zum wissenschaftlichen Erfolg des Transregio 16.

Die langfristige Zukunft der subatomaren Physik liegt in einer noch wesentlich größeren Beschleuniganlage, der International Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR), die zurzeit in Darmstadt am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung mit einem Investitionsvolumen von mehr als einer Milliarde Euro gebaut wird. Diese Anlage bietet insbesondere auch Forschern der Justus-Liebig-Universität Gießen die einmalige Chance, direkt an der globalen Spitzenforschung auf der Suche nach den letzten Geheimnissen der Materie

mitzuwirken. Hierzu ist das von der Hessischen Landesregierung geförderte LOEWE-Exzellenzzentrum HIC-for-FAIR gegründet worden, das in der nächsten Ausgabe des „Spiegels der Forschung“ (Heft 1-2011) vorgestellt wird.

Der Bezug zu HIC-for-FAIR

Ziel des Transregio-Sonderforschungsbereichs 16 ist es, durch Experimente mit Photonenstrahlen die Struktur des Nukleons zu entschlüsseln und damit einen wichtigen Beitrag zur Aufklärung der Struktur der Materie zu liefern. Die Jagd nach den fundamentalen Geheimnissen der Materie wird in Zukunft in noch umfassenderer Weise in Verbindung mit dem Helmholtzzen-

DIE AUTOREN

Volker Metag, Jahrgang 1942, arbeitet am II. Physikalischen Institut der Universität Gießen. Sein zentrales Forschungsfeld ist die Hadronen- und Kernphysik. Er studierte an der TU Berlin und promovierte



an der Universität Heidelberg. Danach war er für mehrere Jahre am Niels Bohr-Institut in Kopenhagen, am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und an der University of Washington in Seattle/USA. Seit 1982 ist er Professor für Experimentalphysik in Gießen. Er ist Mitglied verschiedener internationaler Forschungskollaborationen und ist oder war Mitglied wissen-

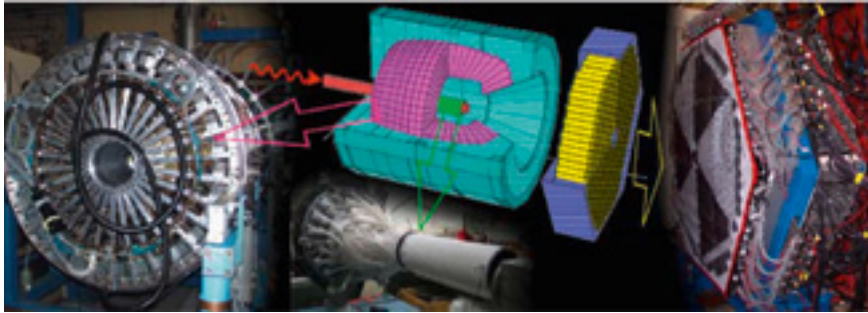
schaftlicher Beiräte verschiedener Großforschungszentren und Vorsitzender des Gutachterausschusses für Hadronen- und Kernphysik des Bundesforschungsministeriums (BMBF). Von 1993 bis 1998 war er als Forschungsdirektor der GSI in Darmstadt an den Vorbereitungen für das FAIR-Projekt verantwortlich beteiligt.

Ulrich Mosel, Jahrgang 1943, ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Gießen. Seine wesentlichen Forschungsfelder waren die Kernstruktur-Physik und Schwerionen-Reaktionen, bevor er sich der Hadronen-Physik zuwandte. Er studierte und promovierte an der Goethe-Universität Frankfurt, bevor er mehrere Jahre in den USA arbeitete, unter anderem am Oak Ridge National Laboratory, University of Tennessee in Knoxville, und an der University of Washington in Seattle. Seit 1972 ist er Professor für The-

oretische Physik in Gießen. Er war Mitglied verschiedener wissenschaftlicher Beratungsgremien des Bundesforschungsministeriums (BMBF), Fachkollegiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG sowie im

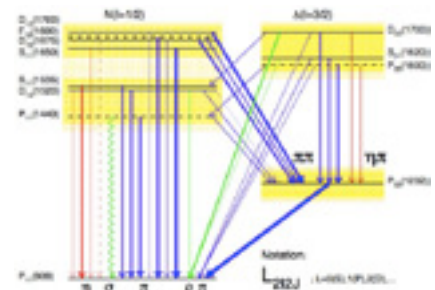


Wissenschaftlichen Beirat der beiden Großforschungszentren GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) in Darmstadt und des Hahn-Meitner-Instituts in Berlin. Gegenwärtig ist er Mitglied des Sonderforschungsbereichs/Transregio TR16, der in der Hadronenphysik arbeitet (siehe auch die Sonderausgabe des „Spiegels der Forschung“ über Spitzenforschung an der Universität Gießen).



■ Abb. 2: Der Crystal Barrel/TAPS-Detektor: Bei der Untersuchung des Anregungsspektrums von Nukleonen werden Mesonen emittiert, kurzlebige Teilchen aus Quarks und Antiquarks, die über Photonen, also hochenergetische Lichtteilchen, zerfallen. Zur Rekonstruktion der Anregungszustände müssen diese Photonen möglichst vollständig nachgewiesen werden in einem Detektor, der den Ort der Reaktion (Target) nahezu vollkommen umschließt. Die Abbildung zeigt in der Mitte des Bildes das Target (rot), umgeben von einem Detektor aus szintillierenden Fasern (grün), dem Crystal Barrel (magenta) und dem in Gießen entwickelten TAPS-Kalorimeter (gelb). Die Arbeitsgruppe von Dr. Rainer Novotny arbeitet daran, die Empfindlichkeit des Detektorsystems weiter zu verbessern und so die Bestrahlungszeiten noch effektiver zu nutzen. Dazu werden hochmoderne neu entwickelte Nachweissysteme implementiert.

Theoretische Analyse der Hadronenspektren



Dass Protonen und Neutronen im Atomkern nicht strukturlos sind, zeigt die Tatsache, dass beide Anregungszustände besitzen. Diese Anregungen können – wie beim Atom – experimentell bestimmt werden. Das Bild zeigt mit seinen horizontalen Balken solche Zustände, die durch verschiedene Quantenzahlen, z.B. $P_{11}(1440)$, gekennzeichnet werden; die Zahlen in Klammern geben die Masse der Resonanz wieder. Während Atome sich nur durch Aussenden von Gamma-Strahlung abregen, emittieren angeregte Protonen und Neutronen vornehmlich andere Teilchen, z.B. η , π , σ , oder ρ -Mesonen. Mit Hilfe so genannter „Rechnungen der gekoppelten Kanäle“ können nun die Übergangsstärken dieser Resonanzen, die wichtige Informationen über den inneren Aufbau enthalten, ermittelt werden. Dies geschieht in den theoretischen Teilprojekten, die mit massivem Einsatz von Rechner-Kapazität versuchen, diese Kopplungsstärken aus den gemessenen Daten heraus zu bestimmen.

trum für Schwerionenforschung (GSI) durch den Bau der International Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) in Darmstadt weitergeführt werden. Von der Forschung an dieser riesigen Beschleunigeranlage (Investitionsvolumen über 1 Milliarde Euro) erwarten die Wissenschaftler Antworten auf so grundlegende Fragen wie: Wodurch hat alle Materie eine Masse? Warum besteht unsere Welt aus Materie und nicht Antimaterie? Was genau passierte beim Urknall, und wie hat sich daraus unser Universum entwickelt?

In dieses internationale Projekt sind von Gießener Seite über die am Transregio 16 beteiligten Wissenschaftler hinaus alle neun im Bereich der subatomaren Physik arbeitenden Professoren mit ihren Mitarbeitern eingebunden. Die Professoren Düren, Kühn, Metag, Scheidenberger und Dr. Novotny waren von Anfang an der Planung der neuen Experimente an FAIR beteiligt und die Theorieprofessoren Cassing, Lenske und Mosel haben we-

sentliche Beiträge zur Formulierung des Forschungsprogramms an FAIR geleistet. Aus Mitteln der Exzellenz-Initiative der hessischen Landesregierung wurde das LOEWE-Zentrum Helmholtz International Center for FAIR (HIC-for-FAIR) als eine Denkfabrik für FAIR gegründet. Im Rahmen dieses LOEWE-Zentrums konnten in Gießen zwei neue W2-Professuren eingerichtet werden, die vor kurzem mit Claudia Höhne und Christian Fischer besetzt worden sind. Beide haben das hohe Forschungspotenzial von FAIR erkannt und bringen sich mit neuem Schwung und neuen Ideen in die experimentellen wie theoretischen Vorbereitungen der Forschung an FAIR ein.

KONTAKT

Prof. Dr. Volker Metag
Justus-Liebig-Universität Gießen
II. Physikalisches Institut
Heinrich-Buff-Ring 16, 35392 Gießen
Telefon: 0641 99-33260
volker.metag@exp2.physik.uni-giessen.de

Die Elektronenbeschleunigeranlage ELSA



■ Abb. 3: Die Beschleunigeranlage besteht aus drei hintereinander geschalteten Teilen: dem Linearbeschleuniger mit Elektronenquelle, dem Synchrotron und dem Stretcherring. Elektronen treten aus einem glühend heißen Metall oder – im Falle polarisierter Elektronen – durch Laserbestrahlung aus einem Kristall aus. Sie werden in den elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern des Linearbeschleunigers zunächst auf ca. 20 Millionen Elektronenvolt vorbeschleunigt (1 Elektronenvolt ist

die Energie, die ein elektrisch einfach geladenes Teilchen beim Durchfallen einer Spannungsdifferenz von 1 Volt erhält). In dem anschließenden Ringbeschleuniger, in dem die Elektronen durch starke Magnete auf einer Kreisbahn gehalten werden, kann die Energie der Elektronen auf 1,6 Milliarden Elektronenvolt erhöht werden. Die Endenergie von 3,5 Milliarden Elektronenvolt erhalten die Elektronen in der letzten Beschleunigerstufe, dem Stretcherring. Danach wird der Elektronenstrahl ausgelenkt

und auf einen dünnen Draht gerichtet, in dem ein Teil der Elektronen abgebremst und ihre Energie auf Photonen, d.h. hochenergetische Lichtquanten, übertragen wird. Der entstehende Photonenstrahl trifft dann auf das Target und löst die photonuklearen Reaktionen aus, die von den Wissenschaftlern des TR16 untersucht werden, um u.a. nähere Informationen über die Struktur von Nukleonen, den Bausteinen der Atomkerne, zu erhalten.